



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## Hydraulik og måleusikkerhed

*ved Struers flowmonitor for afløbssystemer*

Larsen, Torben

*Publication date:*  
1989

*Document Version*  
Accepteret manuscript, peer-review version

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*  
Larsen, T. (1989). *Hydraulik og måleusikkerhed: ved Struers flowmonitor for afløbssystemer*. (s. 1-10).

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# HYDRAULIK OG MÅLEUSIKKERHED ved Struers flowmonitor for afløbssystemer

Foreløbig udgave af 28 12 1989

af

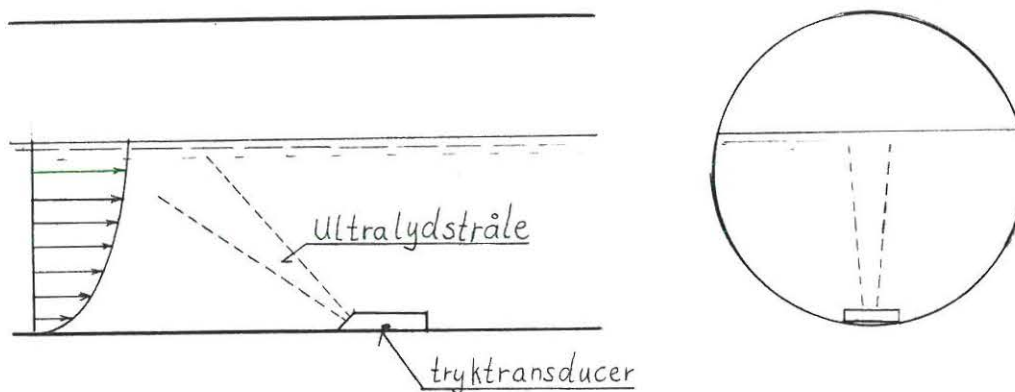
Torben Larsen

Aalborg Universitetscenter

Sohngaardsholmsvej 57 9000 Aalborg tlf 98 14 23 33

## INDLEDNING

Flowmonitorens transducer skal placeres i bunden af afløbsledningen og indeholder en akustisk hastighedsmåler samt en trykmåler, se figur nr. 1. Flowmonitorens måleprincip baserer sig på måling af en karakteristisk hastighed i måletværsnittet samt måling af vanddybden. Ud fra en omregning baseret på en kalibrering, bestemmes herefter tværsnittets middelhastighed, eller med andre ord, den målte hastighed multipliceres med en profilfaktor og man får middelhastigheden. Vanddybden bestemmes ved måling af trykket og tværsnitsarealet beregnes herefter ud fra kendskab til afløbsledningens geometri.



figur nr 1 Transducerens placering i ledningen

I det følgende beskrives de hydrauliske forhold og usikkerheder der er knyttet til anvendelsen af flowmonitoren. Apparattekniske forhold vil ikke blive omtalt.

Dette notat er en forløbige beskrivelse, som vil blive revideret og udbygget med konkrete anbefalinger i forbindelse med den pågående afprøvning og kalibrering af flowmonitoren.

## MÅLING AF VANDDYBDEN

Vanddybden måles ved måling af trykket med en tryktransducer i bunden af transduceren. Da transduceren uundgåeligt har en vis påvirkning af strømningsbilledet i den nærmeste omegn af transduceren, vil trykmålingen blive svagt påvirket af strømningens hastighedshøjde  $V^2/2g$ . Der foretages derfor i flowmonitoren en korrektion herfor baseret på den målte hastighed.

For at den foretagne korrektion skal være rigtig, er det vigtigt, at strømningsbilledet på målestedet i så høj grad som muligt er ligedannet med strømningsbilledet ved kalibrering af måleren. Dette opnås ved at have en lang lige og uforstyrret rørstrækning opstrøms for transduceren.

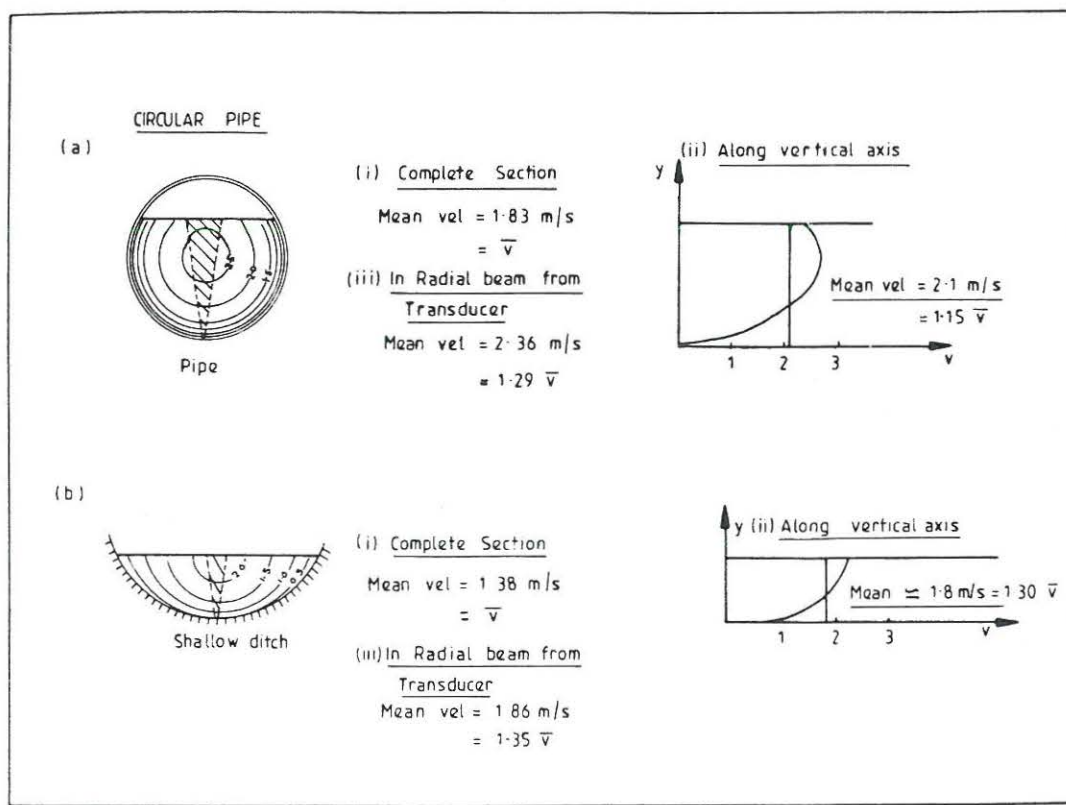
Dybdemålingen kan i praksis ofte kontrolleres ved en midlertidig opstemning af tørvejsvandføringen, hvorved man kan opnå en høj vandstand som let kan måles manuelt.

## HASTIGHEDSFORDELINGEN I RØR

Der vil i alle praktiske situationer være tale om turbulent strømning i rørene. Hastighedsprofilen langs en centralt placeret vertikal vil med tilnærmelse være logaritmisk.

Transduceren måler middelhastigheden i en smal vifte, som rettet fremad under 45 grader med rørets retning. Forholdet mellem den målte middelhastighed og den sande middelhastighed i tværsnittet afhænger af fyldningsgraden af røret. Den målte middelhastighed skal derfor korrigeres ved multiplikation med en såkaldt profilfaktor. Denne korrektion er indlagt i flowmonitorens dataopsamlingsenhed. Imidlertid er det vigtigt, at strømningsbilledet foran transduceren i så høj grad som muligt svarer til det, som er forudsat ved kalibreringen af måleren. Det er især vigtigt, at strømningsbilledet er helt symmetrisk omkring en lodret akse. Der må derfor ikke være retningsændringer, sidetilløb eller andet der kan skabe asymmetri opstrøms for transduceren i en afstand af 30 til 50 gange rørdiameteren.

Fejlen som følge af en forkert hastighedsfordeling i måletværsnittet kan være betydelig, formentlig helt op til 50 % .

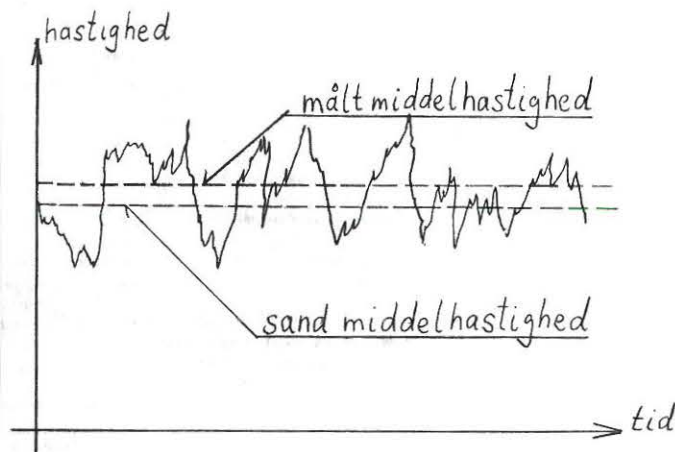


figur nr 2 Hastighedsfordelinger ved forskellig fyldningsgrad

## TURBULENS OG BØLGER

På grund af turbulensen vil hastigheden fluktuere omkring en middelværdi med en standardafvigelse på ca 10 % af middelværdien. Flowmonitoren danner et tidsligt gennemsnit af et stort antal hastighedsmålinger, hvorved fluktuationerne fjernes. Alle hastighedsmålere er afhængige af turbulensgraden. Det gælder f.eks. propeller og også den her anvendte akustiske måler.





figur nr 3 Den aktuelle hastighed som funktion af tiden

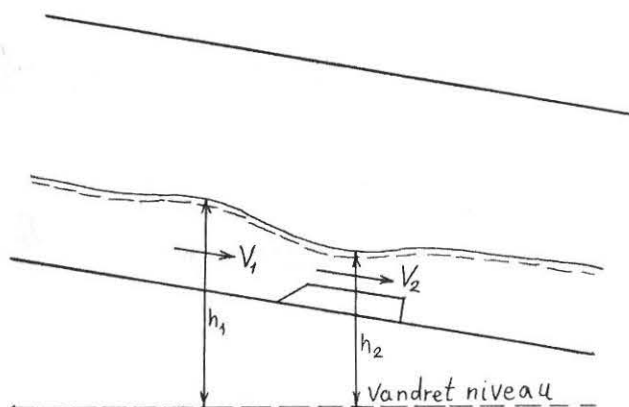
Flowmonitorens følsomhed over for turbulensgraden er medtaget i kalibreringen af instrumentet og vil ikke give anledning til fejl, hvis transduceren er placeret korrekt. Det er derfor væsentligt, at monitoren placeres på et målepunkt, hvor turbulensen er nogenlunde den samme som ved kalibreringen, d.v.s. i et rør med en lang lige tilløbsstrækning uden forstyrrelser eller hydrauliske spring. Såfremt disse forhold ikke er tilfredsstillende kan en fejl på 5 - 10 % forventes.

Det akustiske måleprincip medfører at bevægelsen af bølger på vandoverfladen til en vis grad kan registreres som en strømhastighed. Denne fejlkilde kan derfor forekomme, såfremt der er større forstyrrelser, som f.eks. sidetilløb eller hydraulisk spring, i nærheden af transduceren. Dette bør derfor undgås.

### STATIONÆRE BØLGER PÅ OVERFLADEN

Transduceren eller andre indsnævringer af strømningstværsnittet vil uundgåeligt medføre, at der dannes stationære bølger på overfladen. Når vandybden er stor i forhold til transducerens højde er højden af disse bølger ubetydelig, men ved små vandføringer og dermed ved små vandybder kan disse bølger give systematiske fejl, som der imidlertid i visse tilfælde kan korrigeres for. Disse bølger er årsagen til at måleren har en nedre grænse i måleområdet.

Med en grov tilnærmelse kan bølgenes højde beregnes ud fra energiligningen såfremt vandybden er af samme størrelsesorden, som transduceren, d.v.s. en vandybde på 5 - 10 cm. For større vandybder vil trykfordelingen ikke være hydrostatisk omkring transduceren og energiligningen er for primitiv til løsning af dette problem. Men det er de små dybder, der er relevante i denne sammenhæng.



figur nr 4 Anvendelse af energiligningen

Energiligningen lyder

$$h_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H$$

hvor

$h_1, h_2$  er højde over udgangsniveau

$\alpha_1, \alpha_2$  er hastighedskoefficienter, ca 1.0 - 1.2

$V_1, V_2$  er middelhastigheder

$g$  er tyngdens acceleration  $m^2/sec$

$\Delta H$  er energitabet ( nær nul i dette tilfælde )

Endvidere må kontinuitetsligningen anvendes. Denne lyder

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2$$

hvor

$Q$  er vandføringen

$A_1$ ,  $A_2$  er tværsnitsarealerne

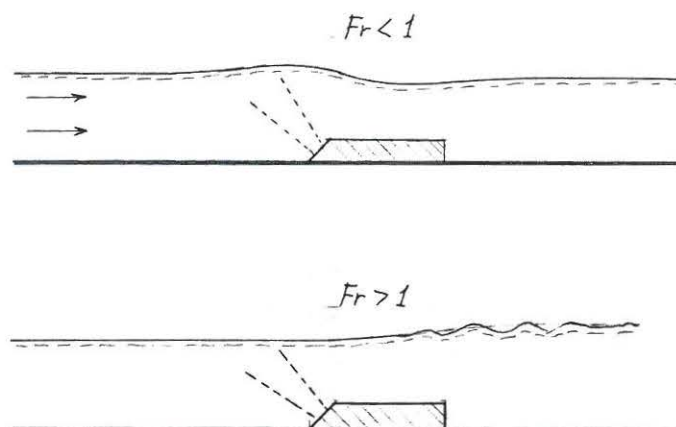
For at løse disse ligninger kræves, at man udregner formeludtryk for tværsnitsarealerne som funktion af vanddybderne. Herefter kan man finde vanddybde og hastighed i et snit, såfremt man kender forholdene i det andet snit. Det anbefales, at man sætter sig ind i teorien for strømninger med frit vandspejl, før man giver sig i kast med dette problem. Der er flere faldgruber.

Løsningen af ovennævnte problem vil formelt set give to løsninger. Den ene løsning svarer til, at der er *strømmende bevægelse* over transduceren og den anden betegnes *strygende bevægelse*. Ved en nøjere analyse af ovennævnte problem kommer man frem til, at disse strømningsformer kan karakteriseres ud fra det dimensionsløse tal, *Froude's tal*, som lyder

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}}$$

hvor  $D$  er middelvanddybden ( areal divideret med bredde )

Såfremt  $F_r < 1$  er bevægelsen strømmende og når  $F_r > 1$  er bevægelsen strygende, desuden betegnes situationen *kritisk strømning* når  $F_r = 1$ . På nedenstående figur ses den markante forskel, der er på strømningsforholdene omkring transduceren, alt efter om Froude's tal er større eller mindre end 1.



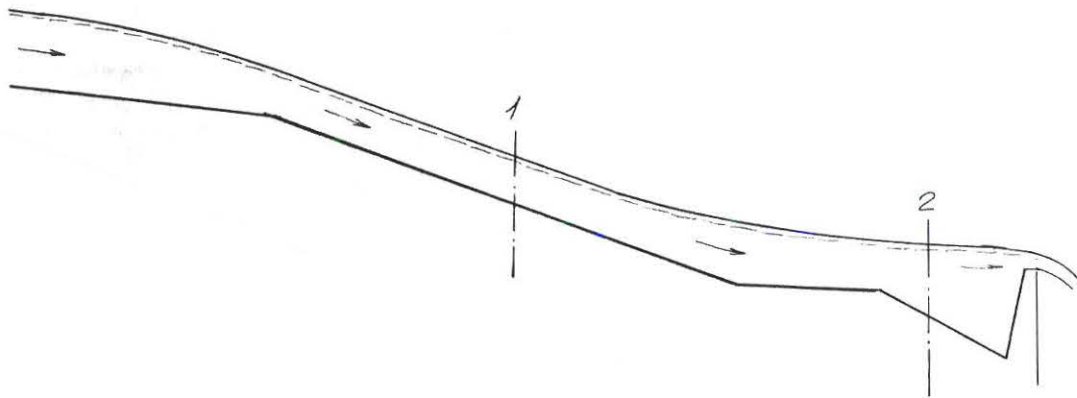
figur nr 5 Vandoverfladens form

## BEREGNING AF FROUDE'S TAL

I forbindelse med planlægning af målinger i afløbssystemet er det vigtigt at kunne vurdere størrelsen af Froude's tal inden for det vandføringsinterval der er relevant på det pågældende sted. Som tidligere omtalt beregnes Froude's tal af

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}}$$

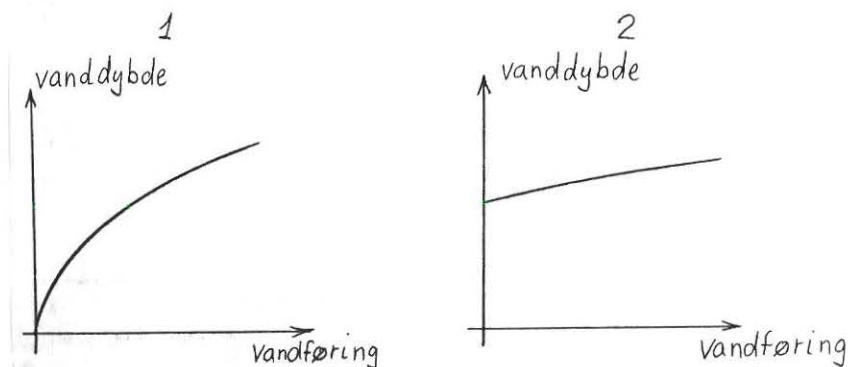
Såfremt man har en længere lige rørstrækning, kan man forvente, at der her vil optræde *naturlig dybde*. Dette er betegnelsen for den ligevægtsituation, der opstår, når vandhastigheden er blevet så stor, at friktionen langs bunden er kommet i ligevægt med tyngdekraftens komponent i rørets længderetning. Dette er langt fra en normal situation for alle punkter i et afløbssystem, hvor stuvninger og sænkninger kan forplante sig rundt især i de større ledninger med lille fald. På figuren er dette illustreret ved to tværsnit.



figur nr 6 Længdeprofil i afløbssystem

I snit 1 har man på grund af de lange lige strækninger på begge sider af snittet naturlig dybde for alle vandføringer. Dette betyder, at man har en eentydig  $Q/H$ -kurve her, d.v.s. man har eentydig sammenhæng mellem vanddybde og vandføring. I det andet tilfælde, snit 2, er vanddybden primært styret af det nedstrøms næsten fastholdte vandspejl ved overløbet. Ved naturlig dybde er faldet på energiligningen lig med faldet på røret, og derfor kan vanddybden bestemmes ud fra f.eks. *Manning-formlen*.





figur nr 7 Q/H-kurver i de to snit

Manning-formlen lyder

$$Q = A M R^{2/3} I^{1/2}$$

hvor

$M$  er Manning-tallet, ca  $70 \text{ m}^{1/3}/\text{sec}$  for kloakrør

$R$  er hydraulisk radius ( areal divideret med våd omkreds )

$I$  er faldet på energilinen lig rørfaldet

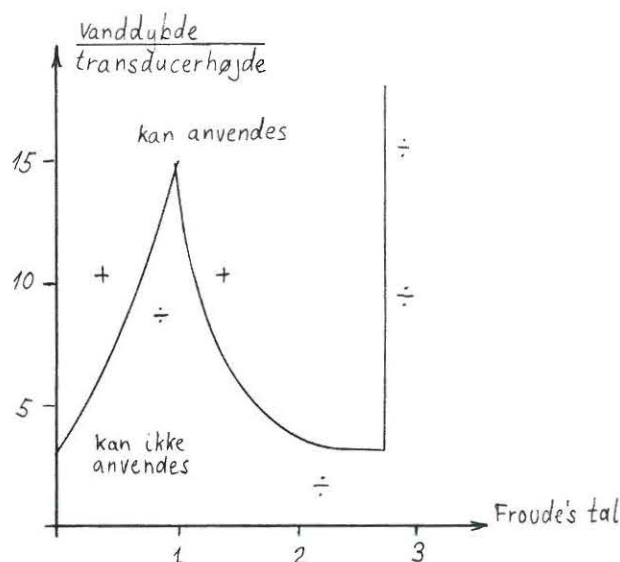
Af Manning-formlen kan man for forskellige værdier af vanddybden konstruere en Q/H-kurve for det aktuelle rør. På denne kurve kan man herefter med den givne vandføring aflæse vanddybden og herefter beregne tværsnittets middelhastighed. Derefter beregnes Froude's tal. Erfaringsmæssigt ved man, at kritisk strømning i afløbsledninger forekommer ved fald på 10 - 15 promille, hvilket er relativt stejlt men ikke er helt ualmindeligt

### KONKLUSION OG ANBEFALINGER ( foreløbige )

Det er af afgørende betydning for en tilfredstillende funktion af flowmonitoren, at den placeres i røret således, at strømningsforholdene i størst muligt omfang svarer til forholdene ved monitorens kalibrering. Man skal her lægge særlig vægt på at nedennævnte forhold bør være tilfredsstillende.

Opstrøms for målepunktet bør der være en lang lige rørstrækning på mindst 30 til 50 gange rørdiameteren uden retningsændringer, ændringer i fald, og uden sidetiløb. Der må ikke forekomme hydraulisk spring på denne strækning. Opstrøms eller nedstrøms for transduceren må der ikke forekomme forstyrrelser der kan skabe bølger på overfladen, som kan forplante sig hen over transduceren.

Inden for det vandføringsinterval man ønsker dækket af pålidelige målinger, skal sammenhørende værdier af vanddybde og Froude's tal ligge i det acceptable område af nedenstående diagram.



figur nr 8 Anbefalet område for anvendelse af flowmonitor  
denne figur er et foreløbigt skøn, som ikke bygger på målinger

I de fleste tilfælde må det anbefales at forsøge at placere flowmonitoren på et sted med strømmende bevægelse, d.v.s. et sted i afløbssystemet hvor man befinder sig i det tilladte område til venstre i diagrammet.

Såfremt tilfredstillende forhold på en aktuel lokalitet ikke kan opnås, kan man evt. ved indsnævring og opstemninger nedstrøms for målepunktet ændre forholdene over transduceren, d.v.s. reducere Froude's tal, således at måleområdet bliver acceptabelt i relation til diagrammet.

## REFERENCER

Bang, A. E.

*Elementær Hydraulik*

Teknisk Forlag, 1985

Pedersen, Fl. Bo.

*Hydraulik*

Den Private Ingeniørfond, 1989

Chow, V. T.

*Open Channel Hydraulics*

Mc Graw-Hill, Students Edition, 1980

Burrows R., Crowder G., Lowther J.

*Sewer flows surveys, An appraisal of combined velocity/depth logger permance by laboratory studies*

University of Liverpool, 1989

Water Research Center

*A guide to short term flow surveys of sewer systems*

WRc Engineering, Swindon, U.K.